

Artículo de investigación

Determinación del nivel de contaminación por partículas suspendidas totales de industrias procesadoras de minerales del municipio de Palermo, Huila, Colombia

Determination of the level of contamination by total suspended particles of mineral processing industries in the municipality of Palermo, Huila, Colombia

Leidy Dayana Cuellar Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0001-5299-2855>

Ingeniería ambiental, Empresas Públicas de Acevedo ,
Acevedo-Colombia

E-mail: Leidydayana19@gmail.com

María Paula Palomá Herrera

<https://orcid.org/0000-0002-8845-1003>

Ingeniería ambiental, Pisicola New York ,
Rivera-Colombia

E-mail: paulapalomah@gmail.com

Natalia Puentes

<https://orcid.org/0000-0002-4545-3682>

MSc Ingeniería y gestión ambiental
Corporación autónoma regional del alto magdalena CAM y Universidad Surcolombiana
Neiva-Colombia

E-mail: ingquimica@yahoo.es

Alcides Polania Patiño

<https://orcid.org/0000-0002-7210-6889>

MSc en Ingeniería En Ciencias Farmaceuticas-
Docente en la Fundación Escuela Tecnológica De Neiva Jesús Oviedo Pérez y
Universidad Surcolombiana
Neiva-Colombia

E-mail: alcides_polaniapa@fet.edu.co

Fecha de recepción: 13 de enero de 2021

Fecha de aprobación: 30 de junio de 2022

DOI: 10.25054/22161325.2897

Resumen

En la zona franca del municipio de Palermo en el departamento del Huila se localizan diez industrias procesadoras de minerales que actúan como centrales en la producción y tratamiento de roca caliza y sus derivados; asimismo, de contaminación atmosférica por emisiones de partículas suspendidas totales. Por lo tanto, se asumió cuantificar el material particulado emitido por las industrias mediante el método de factor de emisión y luego comparar los resultados con los estándares admisibles de partículas suspendidas totales de las fuentes fijas establecidas por la normatividad ambiental vigente colombiana; de esta forma se determinó los niveles de contaminación por partículas suspendidas totales generados por las industrias procesadoras de minerales. La información primaria para el desarrollo de los cálculos del factor de emisión fue obtenida a partir de diez industrias etiquetadas alfabéticamente (desde la A hasta la J). Las fuentes de emisión analizadas en la investigación fueron clasificados como fuentes fijas de actividades de

Leidy Dayana Cuellar Rodríguez, María Paula Paloma Herrera, Natalia Puentes, Alcides Polania Patiño

trituration y molienda, y fuentes de área de descarga de la materia prima. Encontrándose que los niveles de contaminación por partículas suspendidas totales de las diez industrias fue alto, pues sobrepasaron los estándares admisibles de la normatividad ambiental; por lo tanto, los resultados de la investigación ofrecen un antecedente para la realización de futuros estudios que busquen mitigar los niveles de contaminación de la zona; y de igual forma, a determinar una posible relación entre la producción, exposición y morbilidad de los habitantes o transeúntes con el material particulado de la zona.

Palabras clave: contaminación atmosférica; industria minera; material particulado; factor de emisión.

Abstract

In the free zone of the municipality of Palermo in the department of Huila, there are ten mineral processing industries that act as centers in the production and treatment of limestone and its derivatives: likewise, of air pollution due to emissions of total suspended particles. Therefore, it was assumed to quantify the particulate matter emitted by the industries through the emission factor method and then compare the results with the admissible standards of total suspended particles from fixed sources established by current Colombian environmental regulations; in this way, the levels of contamination by total suspended particles generated by the mineral processing industries were determined. The primary data for the development of the emission factor calculations was obtained from ten industries labeled alphabetically (from A to J). The emission sources analyzed in the investigation were classified as fixed sources from crushing and grinding activities, and sources from the raw material discharge area. Finding that the levels of contamination by total suspended particles of the ten industries was high, since they exceeded the admissible standards of environmental regulations; therefore, the results of the investigation offer a background for future studies that seek to mitigate the levels of contamination in the area; and in the same way, to determine a possible relationship between the production, exposure and morbidity of the inhabitants or passers-by with the particulate matter in the area.

Keywords: atmospheric pollution; mining industry; particulate material; emission factor.

1 Introducción

Las Partículas Suspendidas Totales (PST) o también denominado Material Particulado (PM), son partículas coloidales en estado líquido, sólido y gaseoso que se emiten a la atmósfera, como es el caso del polvo en suspensión de las vías, el humo generado por las industrias y las partículas generadas de procesos industrializados (Granada *et al.*, 2014; Vargas & Lange, 2016). Según lo establecido en el 2010 por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), la normatividad colombiana expone que el PM no sedimentan con facilidad gracias a su reducido tamaño y baja densidad, lo que permite que se mantenga suspendido por acción del viento durante lapsos prolongados de tiempo (Martínez, *et al.*, 2018); estas PST varía su composición según el lugar de procedencia y puede estar formado por Hidrocarburos Aromáticos Poicíclicos (HAP), metales, sales, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y mezcla de compuestos que al reaccionar entre ellos genera un nuevo contaminante (Osorio, *et al.*, 2014; Guor, *et al.*, 2017; Quijano, *et al.*, 2017).

El PM o PST tiene formas, composiciones y tamaños diferentes (Ordoñez & Sánchez, 2018), por lo que se clasifican en términos de diámetro aerodinámico, considerando el diámetro de una esfera uniforme en la unidad de densidad que alcanza la velocidad terminal de asentamiento (Arciniegas, 2012); también, las partículas pueden ser clasificadas en aquellas de gran o pequeño tamaño con un diámetro aerodinámico que varía generalmente entre valores inferiores a los 10 μm (PM_{10}) y menores a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) (EPA, 2018). La composición del PM varía de manera física (masa, tamaño y densidad) y química (compuestos orgánicos, inorgánicos, primarios y secundarios) dependiendo de la fuente de procedencia (Préndez, *et al.*, 2007). Desde otra perspectiva se afirma que las PST tiene una gama variada de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas (EPA, 2018).

En el entorno internacional las PST se asocian con actividades mutagénicas y cancerígenas (Martínez, 2018); asimismo, son considerados como la principal causa de desmejoramiento de la calidad del aire (Tapia, *et al.*, 2018). En investigaciones relacionadas con el PM se ha establecido que en países como Perú (González, *et al.*, 2014), Estados

Unidos (EPA, 2016), Chile (Henríquez & Urrea, 2017), Brasil (Blanco & Costa, 2018) y Quito (Ramírez, *et al.*, 2018) son las principales causantes de afecciones sobre la salud y al ambiente sin importar que los contaminantes sean procedentes de fuentes naturales o antropogénicas, lo cual denota una relevancia para implementar distintos métodos que permitan mitigar esta problemática.

En Colombia se han determinado y monitoreado las concentraciones de PST en distintas ciudades, en el caso de la ciudad de Bucaramanga, se determinó la relación entre el incremento de morbilidad y la contaminación extradomiciliaria, donde se analizaron la prevalencia de síntomas como tos seca y estornudo en personas expuestas a zonas contaminadas (Rodríguez, *et al.*, 2012). En la ciudad de Medellín, se han desarrollado mediciones de concentraciones de PM y su variación en el tiempo y el espacio, con la intención de determinar las afectaciones que pueden generar las PST sobre la salud de la población (Gaviria, *et al.*, 2012); de igual forma, en aproximaciones a la ciudad de Medellín, precisamente en el Valle de Aburrá, se frecuentó el registro de mediciones del PM_{2.5} provenientes de los vehículos de combustión a diésel y su relación con las altas afecciones respiratorias (Martínez, 2018). Por último, en la ciudad de Bogotá DC, se han establecido registros de PM a través de la red de monitores de calidad del aire de la ciudad, con la intención de relacionar la cantidad de material particulado respirable y el uso de consultas médicas presentadas sobre la población de rangos entre 18 y 65 años (García, *et al.*, 2013).

Aplicar modelos y simuladores de contaminación del aire es una estrategia frecuentemente utilizada por las ciudades e investigadores pues permite indagar los procesos recurrentes en los que se genera altas concentraciones de PM (Olaya, *et al.*, 2017; Vidal & Pérez, 2017; Watson & Chow, 2020), pero también estos métodos permiten cuantificar la relación que hay entre las emisiones y la concentración presentes en la atmósfera, incluyendo conocer la composición química de las PST de forma ambiental, para luego determinar la calidad de aire que respiran las poblaciones aledañas al área de emisión de PM (Cheng, *et al.*, 2008), con base en lo anterior, se espera identificar las posibles consecuencias que se puedan presentar sobre la salud de las personas al acarrear exposiciones prolongada a los agentes contaminantes aéreos; y por lo tanto, se asuma la toma de decisiones que palien las problemáticas ambientales y sanitarias de las comunidades afectadas (Ramírez, 2017).

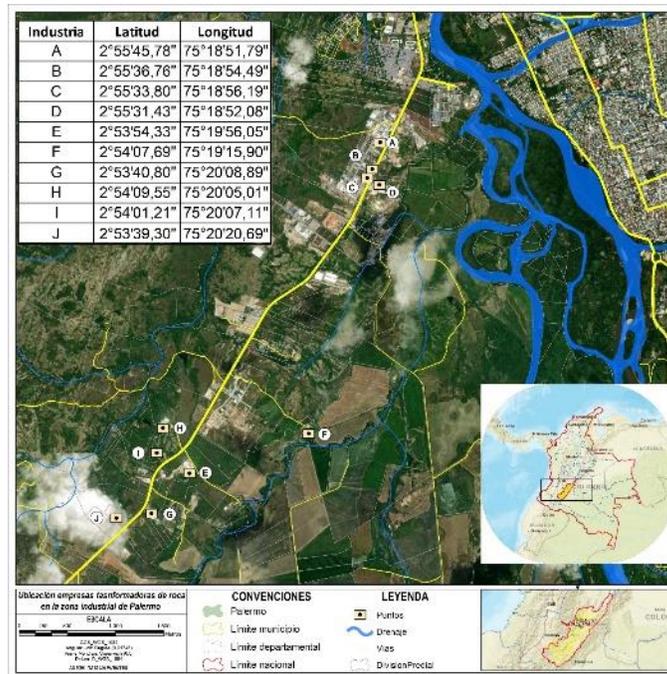
La cuantificación de las emisiones de contaminantes aéreos localizados en las diferentes ciudades del mundo se ha realizado a través de diversas técnicas y métodos que evalúan y registran las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} mediante el uso de equipos estandarizados, incluso aplicando métodos convencionales de gravimetría (Meza *et al.*, 2010). En consecuencia, se propuso determinar el nivel de contaminación dadas por PST o PM generado por las industrias transformadoras de minerales de la zona franca e industrial del municipio de Palermo, Huila, Colombia, mediante el método factor de emisión de las fuentes fijas de trituración, molienda y área de descarga; asimismo, comparando los resultados con los estándares admisibles presentados por la normatividad ambiental vigente colombiana de la resolución 909 de 2008.

2 Materiales y métodos

El proyecto de investigación se fundamentó en la participación voluntaria del personal de las industrias, donde los investigadores/as explicaron de forma preliminar el desarrollo del proyecto y sus apartados como: la problemática, la justificación y el propósito de la investigación, que consistió en determinar el nivel de contaminación dada por las partículas suspendidas totales en el área de estudio; a partir de esto, se desarrolló una investigación de enfoque cuantitativo de tipo no experimental, exploratorio y diseño transeccional descriptivo sobre las industrias procesadoras de minerales de las zonas franca e industrial del municipio de Palermo en el departamento del Huila, Colombia.

2.1. Área de estudio

Las diez industrias (etiquetadas de la A–J) se encuentran ubicadas en la zona franca e industrial del municipio de Palermo a dos kilómetros de la zona urbana de Neiva, precisamente sobre la vía que conduce a la ciudad de Neiva desde los municipios de Palermo y Yaguará (antigua Ruta Nacional 43) (Ver Figura 1)



Nota. Mapa desarrollado con el software ArcGIS®.

Figura 1. Localización de las industrias objeto de estudio.

2.2. Meteorología del área de estudio

El clima actúa como factor de propagación o concentración de contaminantes aéreos; por lo tanto, se recurrió a los registros consignados en las estaciones meteorológicas de los municipios de Palermo y Neiva, que se encuentran bajo la administración del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), las estaciones consultadas fueron: (a) Estación Aeropuerto Benito Salas (Neiva) que se encuentra a 439-m de altitud; (b) Estación Santa Bárbara hallada a 454 m de altitud (Palermo) y (c) Estación El Juncal que se localiza a 460 m de altitud (Palermo), los datos analizados a partir de estas estaciones fueron: la precipitación, temperatura, humedad relativa y dirección del viento entre los años 2012 y 2017 (Rodríguez, et al., 2019).

2.3. Descripción de procesos de producción y actividades industriales

Las diez industrias analizadas están encargadas de la transformación de roca caliza a carbonatos, transformando al día 745 toneladas de materia prima que luego es almacenada en pila, algunas industrias realizan estas operaciones a cielo abierto y otras bajo cubierta; posteriormente efectúan etapas de trituración en la que no se implementan métodos de control de emisión del material particulado que se expone al ambiente. Para el proceso de la molienda las manufacturas usan filtros de manga como métodos de control, a pesar de que se consideran insuficiente para retener y controlar el PM generado, posteriormente se calcula y referencia las toneladas de materia prima, para después pasarlo a la etapa de cribado o tamizaje, de donde se clasifica de acuerdo con la granulometría del material; finalmente, es embalado, almacenado y comercializado.

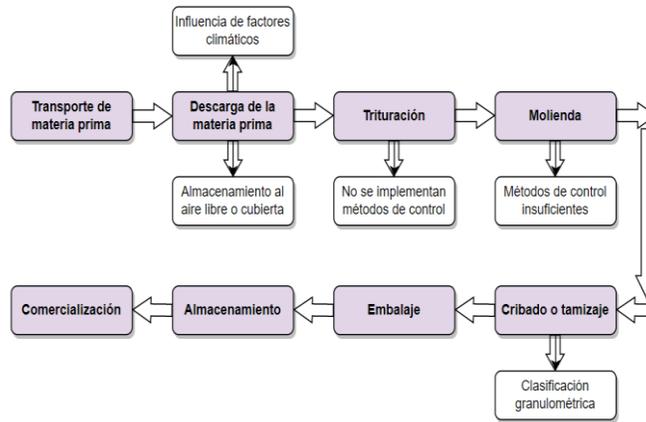
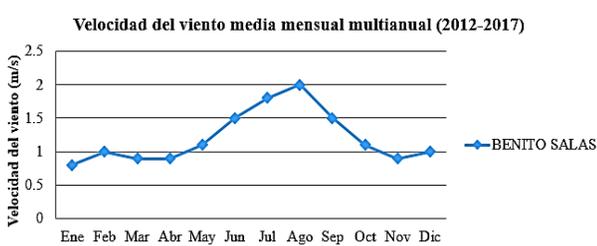
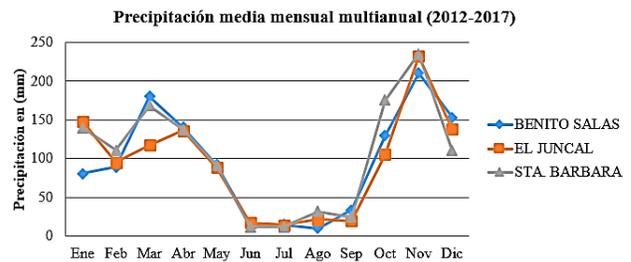


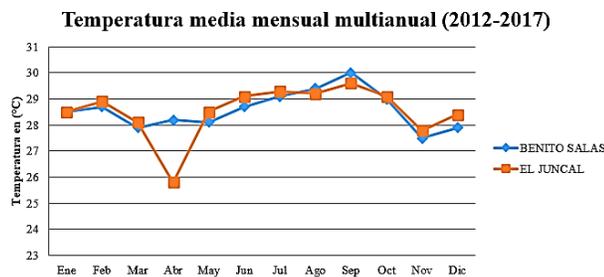
Figura 2. Diagrama de procesos de producción industrial.



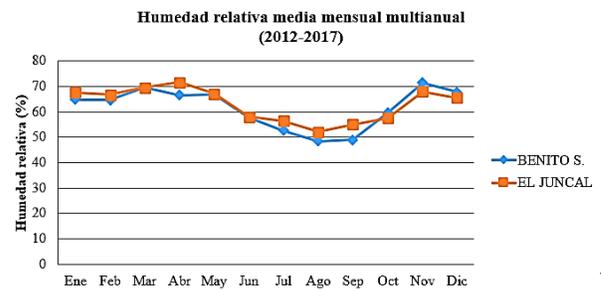
A



B



C



D

Nota. Panel A: Registro anual de la velocidad del viento media mensual multianual (m/s). Panel B: Registro anual de precipitación media mensual multianual (mm). Panel C: Registro anual de temperatura media mensual multianual (°C). Panel D: Registro anual de humedad relativa (%).

Figura 3. Registros e información meteorológica del área de estudio.

2.4. Determinación de factor de emisión

El método implementado para la cuantificación del PST o PM generado por las industrias transformadoras de minerales fue el método factor de emisión, cuyo método fue establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2018) como herramienta paramétrica de emisiones; con base en lo anterior, la Ecuación 1 expresa que el factor de emisiones está dado por:

$$E = A \cdot FE \left(\frac{1-ER}{100} \right) = lb/t \tag{1}$$

Leidy Dayana Cuellar Rodríguez, María Paula Paloma Herrera, Natalia Puentes, Alcides Polania Patiño

Dónde, **E**: Emisiones, **A**: Actividad de la industria, **FE**: Factor de emisión, **ER**: Eficiencia de reducción.

En el caso de las diez industrias de la zona que tienen en común la transformación de la roca caliza, un FE de 0.017 lb • t⁻¹ en el proceso de trituración primario y 0.62-lb • t⁻¹ en el proceso de molienda de roca del AP-42 para la fabricación de óxido de calcio o cal (EPA, 1998). A partir del artículo 13.2.4 Manipulación agregada y pilas de almacenamiento, se usó la fórmula para calcular el FE de la roca en almacenamiento en pila o descarga de la materia prima (EPA, 2006), ver Ecuación 2:

$$FE = K(0.0032) \cdot \left(\frac{U^{1.3}}{\frac{M^{1.4}}{2}} \right) \cdot T = \text{lb/t} \quad (2)$$

Donde, **FE**: Factor de emisión, **K**: Tamaño de partícula multiplicador (adimensional), **U**: Velocidad media de viento (m/s), **M**: Contenido de humedad del material (%), **T**: Tiempo de almacenamiento de la materia prima en pilas.

El tamaño de la partícula fue asignado con un valor de 0.72, porque el tamaño de la partícula aerodinámica es < 30 µm. La velocidad del viento usada fue de 2 m/s según lo reportado por el IDEAM. La roca caliza mantuvo un contenido de humedad entre 0.25 y 4.8 %, por lo cual se usó un valor de 0.3 % acorde a la altitud (480 m) y la temperatura media (28.5 °C) que presenta el área de estudio. Por lo tanto, se especifica que los resultados analizados en la investigación están relacionados con las condiciones meteorológicas del momento. El tiempo de almacenamiento en pila de la materia prima fue de 24 horas al día, información que fue suministrada por las industrias (Puentes, 2017).

Después, se identificaron tres actividades de producción de las industrias que generan mayor PM, entre ellas; la descarga de materia prima o almacenamiento en pila, la trituración y la molienda de la roca; para cada actividad se cuantificaron las emisiones mediante diferentes formulaciones, es así como el cálculo de emisión en la actividad de descarga de la materia prima fue establecido a través de la Ecuación 3:

$$E_d = \left(\frac{A \cdot FE}{AD} \right) = \text{mg/s} \cdot \text{m}^2 \quad (3)$$

Donde, **E_d**: Emisiones área de descarga, **A**: Actividad de la industria, **FE**: Factor de emisión, **AD**: Área de la descarga de la materia prima.

Las industrias en esta actividad no implementaron métodos de reducción de PM; por lo tanto, no se aplicó la eficiencia de reducción en el cálculo de emisión; luego, para el estimar la emisión de la actividad de trituración de la materia prima, se acudió a la aplicación de la Ecuación 4:

$$E_t = \left(\frac{A \cdot FE}{Q^\circ} \right) = \text{mg/m}^3 \quad (4)$$

Donde, **E_t**: Emisiones proceso de trituración, **A**: Actividad de la industria, **FE**: Factor de emisión, **Q^o**: Caudal de emisión.

Respecto al caudal de emisión de las industrias, se aplicó la fórmula contemplada por Puentes (2017), quien recomienda ajustar las magnitudes de las emisiones cuantificadas y las magnitudes de los estándares admisibles estandarizados por la normatividad; por consiguiente, para el caudal se empleó 53 Ft³ • min⁻¹; y de igual forma, en estas actividades industriales se aplicaron métodos de reducción. Por último, para hallar los valores de emisión de la actividad de molienda de la materia prima se usó la Ecuación 5:

$$E_m = A \cdot FE \left(\frac{1-ER}{100} \right) = \text{mg/m}^3 \quad (5)$$

Donde, **E_m**: Emisiones proceso de molienda, **A**: Actividad de la industria, **FE**: Factor de emisión, **ER**: Eficiencia de reducción, **Q^o**: Caudal de emisión.

Las industrias objeto de estudio para la actividad de molienda usaron filtros de manga para controlar las emisiones de material particulado, según el número de mangas por filtro se asumió la ER entre un 90 y 99 %; asimismo, se implementó el Q^o para ajustar las magnitudes.

Tan pronto se determinaron los factores de emisión de las fuentes fijas, estas fueron comparadas con los valores establecidos por los estándares admisibles de emisión de fuentes fijas que relaciona los contaminantes por partículas suspendidas totales y que hacen parte del artículo 4 del capítulo II de la resolución de 909 del 2008, como aspecto fundamental de la normativa ambiental vigente de Colombia.

2.5. Aritmética de factor de emisión de la industria A

A continuación, se explica el modelo usado para la determinación de las emisiones de PM de todas las industrias (A – J) que fueron objeto de estudio; por ejemplo, los cálculos usados para determinar los factores de emisión de PST o PM sobre la industria A en el área de descarga de la materia prima y establecida como una fuente puntual, consistieron en:

$$FE = 0.72 (0.0032) \cdot \left(\frac{2^{1,3}}{\frac{5}{0.3^{1,4}}} \right) \cdot 24 \text{ h} = 0.24 \text{ lb/t}$$

$$E = (112 \text{ t/día}) \cdot (0.24 \text{ lb/t}) \cdot (454 \text{ g/lb}) \cdot (1000 \text{ mg/g}) \cdot (1 \text{ día}/86400 \text{ s}) = 140.06 \text{ mg/s}$$

$$E = (140.06 \text{ mg/s}) / (2000 \text{ m}^2) = 0.70 \text{ mg/s}\cdot\text{m}^2$$

Por esta razón, por cada metro cuadrado de apilamiento de la materia prima de la industria A, se produjo una emisión de 0.70 mg/s•m² de PM; después, se calculó el factor de emisión de PM o PST del proceso de trituración de la materia prima (fuente fija), y para ello se estableció que:

$$FE = (112 \text{ t/día}) \cdot (0.017 \text{ lb/t}) = 1904 \text{ lb/día}$$

$$E = (1.904 \text{ lb/día}) \cdot (453592 \text{ mg/lb}) \cdot (1 \text{ día}/8 \text{ h}) \cdot (1 \text{ h}/60 \text{ min}) = 1799.24 \text{ mg/min}$$

Entonces resulta que en un día la industria A, durante las labores de ocho horas produjo una emisión de 1799.24 mg•s⁻¹ de PM en el proceso de trituración de la roca caliza. Ahora, durante el cálculo del factor de emisión de PST en el proceso de molienda de la materia prima (fuente fija) se dedujo que:

$$FE = (112 \text{ t/día}) \cdot (0.62 \text{ lb/t}) \cdot (1-95/100) = 3.472 \text{ lb/día}$$

$$E = (3.472 \text{ lb/día}) \cdot (453592 \text{ mg/lb}) \cdot (1 \text{ día}/8 \text{ h}) \cdot (1 \text{ h}/60 \text{ min}) = 3280.98 \text{ mg/min}$$

En el proceso de molimiento de la roca caliza de la industria A, se obtuvo una emisión de 3280.98 mg•min⁻¹ de PM. Finalmente, para el cálculo de la emisión de PM o PST de las fuentes fijas con el caudal de emisión, se instituyó que:

$$E = \left(\frac{5 \cdot 080 \cdot 22 \text{ mg}}{\frac{53 \text{ Ft}^3}{\text{min}}} \right) = 95.85 \text{ mg/ft}^3$$

$$E = (95.85 \text{ mg/ft}^3) \cdot (35.3147 \text{ ft}^3/\text{m}^3) = 3385.02 \text{ mg/m}^3$$

De ahí que mediante el caudal de emisión de la industria A se logró establecer que por cada metro cúbico de materia prima se emitió 3385.02 mg/m³ de PM, siendo este el valor resultante de la sumatoria de las emisiones de los procesos de trituración y molienda catalogados como fuentes fijas de la industria A.

3 Resultados y discusión

Los FE calculados de las diez industrias objeto de estudio etiquetadas con las letras del abecedario de la A–J, establecieron que las emisiones generadas en el área de almacenamiento en pila por la descarga de la materia prima; donde, la mayoría de las industrias no generaron emisiones alarmantes (ver Tabla 1). Sin embargo, la industria G, presentó la emisión más alta en esta etapa del proceso, a pesar de que su resultado sólo presentó un valor 0.75 mg/s•m² esto pudo ocasionarse debido a que la materia prima de 60 t/día contó con un área relativamente pequeña para su almacenamiento, caso contrario a lo ocurrido con la industria J, donde se almacenó un 20 % menos de la materia prima en un área de 3000 m². Al contrario de analizar el comportamiento de la emisión de las industrias A y E estas contaron con la misma cantidad de materia prima, pues se determinó una variación en la emisión debido al área disponible para su almacenamiento.

Todas las industrias que efectuaron actividades operativas en espacios abiertos demostraron que la materia prima estuvo expuesta a los fenómenos meteorológicos, que contribuyeron de alguna manera a la dispersión del contaminante; pues, la velocidad y dirección del viento se consideran variables meteorológicas que tienen efecto directo en la dispersión de los contaminantes (Arrieta, 2016). A pesar de que la zona franca de Palermo se encuentra entre la cordillera central y oriental y sobre la planicie al margen del río Magdalena, se observó que sobre esta topografía la velocidad del viento en el área de estudio fue de 7.2 km•h⁻¹, de donde según la escala de *Beaufort* corresponde a un viento ligero y moderado, lo cual no tiene gran influencia en la dispersión del PM (Uribe & Suárez, 2009).

Respecto a las emisiones producidas por las actividades de trituración fueron elevadas (de 1198.86 y 285.44 mg/m³ de PM) sobrepasando los límites permisibles de la norma que consisten en 250 mg/m³. Es así como sobre la Tabla 2, se registraron las emisiones expuestas por todas las industrias de la zona franca e industrial siendo estas de 5985.20 mg/m³ de PM y debiéndose a que todas las industrias usaron trituradoras sin ningún tipo de control o reducción de emisiones.

Tabla 1. Emisión de material particulado en el área de descarga de la materia prima.

Industrias	A (t/día)	FE (lb)	Área (m ²)	Emisión de PM (mg/s • m ²)
A	112	0.24	2000	0.07
B	40	0.24	100	0.50
C	30	0.24	150	0.25
D	120	0.24	300	0.50
E	112	0.24	5000	0.03
F	70	0.24	150	0.59
G	60	0.24	100	0.75
H	105	0.24	3000	0.04
I	48	0.24	100	0.60
J	48	0.24	3000	0.02
Total	-	-	-	3.35

A, actividad de descarga de las industrias; FE, factor de emisión de la roca caliza.

Tabla 2. Emisión de material particulado en la actividad de trituración.

Industrias	A (t/día)	FE (lb)	H	Q° (ft ³ /min)	Emisión de PM (mg/m ³)
A	112	0.017	8	53	1198.86
B	40	0.017	10	53	342.53
C	30	0.017	9	53	285.44
D	120	0.017	16	53	642.24
E	112	0.017	8	53	1198.86
F	70	0.017	8	53	749.29
G	60	0.017	16	53	321.12
H	105	0.017	18	53	499.52
I	48	0.017	11	53	373.67
J	48	0.017	11	53	373.67
Total	745	-	-	-	5985.20

A, actividad de trituración de las industrias; FE, Factor de Emisión de la roca caliza hallado en el Ap-42; H, horas de trabajo en un día; Q°: caudal de emisión de las industrias.

Las industrias durante la actividad de molienda presentaron valores de ER ya que implementan filtros de manga como métodos de control; sin embargo, esa ER es nula ya que la cantidad de mangas en los filtros no es suficiente para remover el PM generado durante los procesos de producción y el total de roca que se muele al día (ver Tabla 3). En relación con las emisiones de PST de las actividades de trituración y molienda de la roca caliza clasificadas como fuentes fijas, se encontró que este se hallaba en un lugar inamovible aun cuando su descarga se produjo de forma dispersa (MAVDT, 2010). Se encontró que la industria A, es la que más emite PM a la atmósfera, con una contribución del 23.09 % y la industria J la que menos emite con un aporte del 4.40 %. También se observó que, en la mayoría de las industrias, la actividad de molienda emite más PM que la actividad de trituración, y esto puede deberse a que el molimiento de la roca genera partículas de tamaños reducidos que son difíciles de retener con las pocas mangas de los filtros implementados para la remoción de las PST (Echeverri Londoño, 2008). A excepción de las industrias E, F, H y J estas generaron más PM en la trituración, debido a que usan un poco más de mangas en los filtros durante su etapa de molienda, pero aun así no fueron suficientes para remover la cantidad de PM que genera la cantidad de materia prima que transforman al día (Ver Tabla 4).

Tabla 3. Emisión de material particulado en la actividad de molienda.

Industrias	A (t/día)	FE (lb)	ER	H	Q°(ft ³ /min)	Emisión de PM (mg/m ³)
A	112	0.62	0.05	8	53	2186.16
B	40	0.62	0.1	10	53	1249.23
C	30	0.62	0.1	9	53	1041.03
D	120	0.62	0.05	16	53	1171.16
E	112	0.62	0.02	8	53	874.46
F	70	0.62	0.02	8	53	546.54
G	60	0.62	0.04	16	53	468.46
H	105	0.62	0.01	18	53	182.18
I	48	0.62	0.05	11	53	681.40
J	48	0.62	0.02	11	53	272.56
Total	745	-	-	-	-	8673.18

Tabla 4. Emisión de material particulado por las fuentes fijas.

Industrias	Emisión de PM en la trituración mg/m ³	Emisión de PM en el molimiento mg/m ³	Emisión de PM Total fuentes fijas mg/m ³	%
A	1198.86	2186.16	3385.02	23.09
B	342.53	1249.23	1591.76	10.85
C	285.44	1041.03	1326.47	9.04
D	642.24	1171.16	1813.40	12.37
E	1198.86	874.46	2073.32	14.14
F	749.29	54.54	1295.83	8.84
G	321.12	468.46	789.58	5.38
H	499.52	182.18	682.70	4.65
I	373.67	681.40	1055.07	7.19
J	373.67	272.56	646.23	4.40
Total	5985.20	8673.18	14658.38	100

En la Figura 4 se observa que las fuentes fijas de todas las industrias estudiadas de la zona franca sobrepasan los estándares admisibles de la normatividad ambiental vigente. Las industrias existentes están amparadas por la normatividad que les permite establecer un flujo $\leq 0.5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de PM, cuyo estándar admisible es 250 mg/m^3 (MAVDT, 2008). La industria A sobrepasa alarmantemente el valor de 250 mg/m^3 , y en cierto modo las industrias H y J los exceden en una menor proporción.

Al comparar la estrecha relación que existe entre la exposición al PM y el incremento de la morbilidad sobre la población, se deduce que al evidenciarse altos niveles de PM_{10} como indicador de la contaminación del aire en el entorno urbano donde residen y trabajan las personas se contribuye a un mayor riesgo de enfermedad respiratoria (Martínez, et al., 2011).

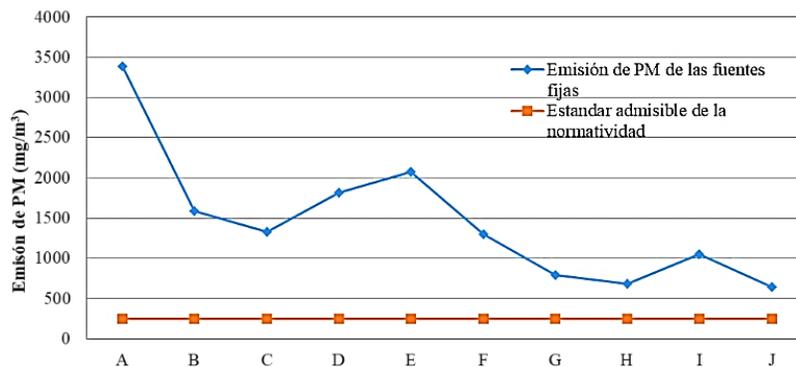


Figura 4. Emisiones de PM de las fuentes fijas de las industrias objeto de estudio con el estándar admisible de la normatividad ambiental vigente. Comparación de valores de emisiones fijas con los parámetros de la resolución 909 de junio de 2008.

Debido al alto nivel de contaminación de PM determinado en la zona franca e industrial, posiblemente se puede estar afectando la salud de las personas que se desplazan por la vía, así como también aquellas que residen aledañas a la zona franca y/o que trabajan en estas industrias.

4 Conclusiones

Las industrias transformadoras de minerales ubicadas sobre la vía que de la ciudad de Neiva conduce al municipio de Palermo Huila, generan 14658.38 mg/m³ de PM, por lo que es importante que esta zona cuente con suficiente arborización, ya que las barreras vivas son vallas que permiten moderar la velocidad del viento y consiguen amortiguar el ruido y minimizar el flujo y dispersión de material particulado. La actividad de molimiento de la roca caliza en las industrias es la de mayor emisión, pues generan 8673.18 mg/m³ de PM al día, seguido por la actividad de la trituración con 5985.20mg/m³ de PM al día. Cabe resaltar que la normatividad colombiana no presenta límite de permisibilidad sobre emisión de almacenamiento de materia prima en pila; aun así, sobre las diez industrias se determinó una emisión 3.35 mg/s·m² de PM al día. Aunque en este último es baja la emisión, es importante implementar técnicas de prevención como lo son el cerramiento o cubrimiento del área de descarga de la materia prima, para evitar altas emisiones de PM, e implementar una cantidad adecuada de filtros de mangas en los molinos, de acuerdo con la cantidad de materia prima que transforman al día.

Las fuentes fijas de las diez industrias sobrepasan el estándar admisible (250 mg/m³) de la normatividad ambiental vigente (resolución 909 del 2008), siendo la industria A, la que presenta el valor más alto, generando así, 3385.0 mg/m³ de PM al día, en el área de molimiento la industria H, es la única que cumple y no pasa el estándar admisible de la norma, emitiendo 182.18 mg/m³ de PST al día.

Al sobrepasar los estándar admisible de la normatividad ambiental, el nivel de contaminación por la emisión de PM de las industrias transformadoras de minerales es alto, lo que puede traer consigo graves consecuencias al medio ambiente, y a la salud de las personas que laboran o residen en las industrias que son colindantes a la zona, e inclusive con las personas que transitan por la vía, por lo que se hace necesaria la implementación de técnicas que permitan mitigar la generación de contaminantes particulados, y de igual forma, establecer el uso de agentes humectantes químicos, que generen peso sobre el PM que se emiten en los diferentes procesos de transformación dentro de las industrias, como es el caso de tensoactivos o surfactantes que actúan como emulsionantes, humectantes o detergentes que no afectan otros recursos naturales como el agua y el suelo.

Se ha comprobado la estrecha relación que existe entre la exposición al PM y el incremento de morbilidad, pues actualmente se exhibe que los niveles altos de PM₁₀ son indicadores de la contaminación del aire en el entorno urbano donde se residen o trabajan las personas; de igual manera, en que se contribuye al riesgo de presentar una afección respiratoria y la pérdida de calidad de vida con la contaminación por material particulado. A partir de lo anterior se presume que el alto nivel de contaminación de PM determinado en la zona franca e industrial puede influir considerablemente en la salud de las personas que se desplazan por la vía o residen adyacentes a la zona franca y/o que trabajan en dichas industrias.

5 Referencias Bibliográficas

- Arciniegas, A. C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul* (34), 195-213.
- Arrieta, A. J. (2016). Dispersión de material particulado (PM₁₀) con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Rev. Ing. Investigación y Desarrollo*, 16(2), 43-54. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>
- Blanco, A., & Costa, L. F. (2018). Efeitos da exposição a poluentes do ar na saúde das crianças de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. *Cuadernos de Salud Pública*, 34(3). <https://doi.org/10.1590/0102-311X00006617>
- Cheng, K., Barrera, J. C., Mederos, O. N., Valdés, J. M., Cantero, A., & Romero, C. A. (2008). Morbidity and mortality in the surgery of emphysematous bullae. *Revista Cubana de Cirugía*, 47(1), 105-121.
- Echeverri Londoño, C. A. (2008). Diseño de filtros de talegas. *Rev. ing. U Medellín*, 7(12), 43-60.
- EPA. (1998). Factor de emisión de fabricación de cal. Recuperado el 7 de octubre de 2018, de <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s17.pdf>

- EPA. (2006). Aggregate Handling and Storage Piles. Recuperado el 07 de octubre de 2018, de <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s0204.pdf>
- EPA. (2016). Estudio del transporte de material particulado PM₁₀ a través de la frontera Imperial Valley/Mexicali. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de https://search.epa.gov/epasearch/epasearch?querytext=material+particulado&typeofsearch=area&doctype=all&originalquerytext=compose+clasifican+las+particulas&areaname=&faq=false&site=epa_default&filter=sample4filt.hts&fld=ttnmain1&url_directory=&sessionid=0
- EPA. (2018a). Conceptos básicos sobre el material particulado. Recuperado el 29 de octubre de 2018, de <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (2018b). Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire. Recuperado el 25 de octubre de 2018, de <https://www3.epa.gov/ttn/catc/cica/files/fdesppis.pdf>
- EPA. (2018c). Información básica sobre los factores de emisión. Recuperado el 2018 de octubre de 07, de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification#About%20Emissions%20Factors>
- García, J. C., & Vaca, M. L. (2013). Consulta médica en población en edad productiva y contaminación atmosférica en Bogotá: 2008 y 2010. *Salud pública*, 15(4), 495-502.
- Gaviria, C. F., Muñoz, J. C., & González, G. J. (2012). contaminación del aire y vulnerabilidad de individuos expuestos: un caso de estudio para el centro de Medellín. *Rev. Fac. Na. Salud Pública*, 30(3), 316-327.
- González, G. F., Zevallos, A., González, C., & Núñez, D. (2014). Environmental pollution, climate variability and climate change: a review of health impacts on the peruvian population. *Salud pública*, 31(3), 547-556.
- Granada, L. F., Pérez, I., Valencia, M., Rojas, R., & Herrera, I. (2014). Sistema para el manejo de la calidad del aire en la ciudad de Cali, Colombia. *Ingeniería Industrial*, 35(1), 13-24.
- Guor, F., author, X., Yuan, Z., Cho, M. H., Chao, H., & Kai, T. (2017). PM_{2.5} particulates and metallic elements (Ni, Cu, Zn, Cd and Pb) study in a mixed area of summer season in Shalu, Taiwan. *Geoquímica ambiental y salud*, 39(4), 791-802. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9848-7>
- Henríquez, G., & Urrea, C. (2017). Association between air pollution and emergency consultations for respiratory diseases. *Revista médica de Chile*, 145(11), 1371-1377. <https://dx.doi.org/10.4067/s0034-98872017001101371>
- Martínez L, E., Quiroz, C. M., & Rúa, J. A. (2011). Morbilidad respiratoria asociada con la exposición a material particulado en el ambiente. *Rev. Fac. Na. de Salud Pública*, 29(4), 454-460.
- Martínez, A., Sainz, S., Blanco, C., Oduber, F., Calvo, A., Castro, A., & Fraile, R. (2018). Influencia de los parámetros meteorológicos en la contaminación del aire en la ciudad de Santander. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/11450>
- Martínez, J. D. (2018). Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras: consideraciones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Salud Pública*, 20(1), 126-131. <https://doi.org/10.15446/rsap.V20n1.57038>
- MAVDT. (2008). Normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Recuperado el 07 de octubre de 2018, de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-909-de-2008.pdf>
- MAVDT. (2010). Resolución 610. Recuperado el 24 de octubre de 2018, de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Meza, L. M., Quintero, M., & García, R. y. (2010). Estimación de Factores de Emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. *Información tecnológica*, 21(4), 45-56.
- Olaya, J., Ovallea, D. P., & Urbanoa, C. L. (2017). On the PM_{2.5}/PM₁₀ fraction estimation. *DINA*, 84(203), 343-348.
- Ordoñez, C., & Sánchez, O. (2018). Caracterización de la PM_{2.5} químico - morfológica en Lima metropolitana con microscopía electrónica de barrido (SEM). *Acta Nova*, 8(3), 397-420.
- Osorio, s., Hernández, L., Osorio, R., Sarmiento, R., González, Y., Pérez, Y., . . . Patiño, N. (2014). Prevalencia de mercurio y plomo en población general de Bogotá 2012/2013. *Salud Publica*, 16(4), 621-628. <https://doi.org/10.15446/rsap.v16n4.38675>

- Préndez, M., Corvalán, R., & Cisternas, M. (2007). Estudio Preliminar del Material Particulado de Fuentes Estacionarias: Aplicación al Sistema de Compensación de Emisiones en la Región Metropolitana. *Información tecnológica*, 18(2), 93-103. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000200015>
- Puentes, N. (2017). Determinación de las Concentraciones de Metales Pesados (Pb, Cu, Fe y Cr) en el Material Particulado Menor a 10 Micrómetros (PM₁₀) e identificación de las fuentes de Emisión en el Área de influencia de la Zona Industrial del Municipio de Palermo Huila.
- Quijano, A., Quijano, M. J., & Meléndez, I. (2017). Genotoxicidad de los hidrocarburos aromáticos policíclicos extraídos mediante el sistema diclorometano-etanol-tolueno en muestras del aire de Cúcuta, norte de Santander, Colombia. *Acta toxicol. argent.*, 25(1), 347-356.
- Ramírez, L. J., Armijos, M., Crespo, M., Pino, S. P., & Álvarez, C. I. (2018). Modelamiento geoestadístico de mediciones de concentración de material particulado (PM₁₀) para la validación de un método simplificado. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v79i1.1143>
- Ramírez, M. Á. (2017). Generalized Linear Models (GLM) for spatial interpolation of PM10 using Landsat satellite images for the city of Bogotá, Colombia. *Perspectiva geográfica*, 22(2), 105-121.
- Rodríguez, A. L., Castro, H., & Rey, J. J. (2012). The effects of air pollution on respiratory health in susceptible populations: a multilevel study in Bucaramanga, Colombia. *Salud pública*, 28(4), 749-57. <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2012000400014>
- Rodríguez, J., Polania Patiño, A., Zapata Ríos, E., & Montañez, M. (2019). Caracterización fisicoquímica del agua de la quebrada La Toma, de la ciudad de Neiva, Huila, Colombia. *Teknos Revista Científica*, 19(1), 27-36. <https://doi.org/10.25044/25392190.979>
- Tapia, V., Carbajal, V., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Traffic regulation and environmental pollution by particulate material (2.5 and 10), sulfur dioxide, and nitrogen dioxide in Metropolitan Lima, Perú. *Salud Publica*, 35(2), 352-3250.
- Uribe, L. J., & Suárez, N. (2009). Evaluación de la calidad del aire del valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación. <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/15004>
- Vargas, S., & Lange, D. (2016). Sistema aéreo de medición de gases contaminantes basado en un UAV, resultados preliminares. *Acta Nova*, 7(2), 194-212.
- Vidal, O. A., & Pérez, A. (2017). Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from a Paper Factory Using the AERMOD Model. *Ingeniería*, 23(1). <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2012000400014>
- Watson, J., & Chow, J. (2000). Desert Research Institute. Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions: <http://www.dri.edu/atmospheric-sciences>

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia
Creative Commons Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)

